

TRABAJO FIN DE GRADO

Curso 2018/19

Aplicación de SIPMs en detectores de centelleo de NaI (Tl); retos y oportunidades

Dpto. Física Teórica-Universidad de Zaragoza

Pablo Sola Gil

Junio de 2019

Índice

1.-Objetivos.....	1
2.-Introducción.....	1
2.1-Detectores de radiación y partículas	1
2.2-Interacción entre radiación y materia	5
3.-Descripción del montaje experimental.....	7
4.-Metodología.....	12
5.-Resultados	14
5.1-Respuesta temporal	14
5.2-Linealidad.....	16
5.3-Resolución.....	18
5.4-Recolección de luz.....	20
6.-Conclusiones	21
Bibliografía	22

1.-Objetivos

Este Trabajo Fin de Grado se desarrolla en el campo de la física nuclear y de partículas. El objetivo principal del trabajo consiste en realizar un estudio comparativo entre fotomultiplicadores de distintas tecnologías acoplados al mismo material centelleador: el yoduro de sodio. Los fotomultiplicadores de tubo de vacío (PMT) son uno de los dispositivos fotosensores más empleados debido a su gran versatilidad y buen balance que presentan entre todas sus características: respuesta rápida, alta sensibilidad, alto factor de ganancia. Los fotomultiplicadores de silicio (SIPM), son dispositivos fotodetectores semiconductores que se encuentran todavía en fase de desarrollo, pero ofrecen muchas ventajas que hacen interesante explorar su aplicación en nuevos ámbitos. Los principales parámetros que se van a comparar a lo largo de este trabajo son:

- 1.-Respuesta temporal
- 2.-La linealidad
- 3.-La resolución
- 4.-La recolección de luz

Aunque también se tendrán en cuenta aspectos como el voltaje de alimentación, tamaño, precio y corriente oscura, este último a pesar de ser un tema importante en muchas de las aplicaciones de estos sensores, se tratará solo lateralmente ya que su medida directa resulta complicada y queda fuera del ámbito del trabajo.

2.-Introducción

2.1-Detectores de radiación y partículas

La identificación y cuantificación de la presencia de radiación y partículas se requiere en una gran variedad de ámbitos como industria, medicina nuclear, investigación o medioambiente. Para ello se utilizan dispositivos de medida adecuados los cuales interesará que presenten alta sensibilidad y buena resolución.

Los dispositivos de detección de radiación más comunes en la física nuclear y de partículas son los detectores de centelleo. Los detectores de centelleo son sensibles a todo tipo de radiación: alfa, beta, gamma, neutrones, etc. Sin embargo este trabajo se ha centrado en su aplicación en detección de radiación gamma. En ellos la detección de radiación ionizante se fundamenta en los destellos que se producen en ciertos materiales denominados centelleadores cuando una partícula cargada deposita energía.

El proceso de centelleo implica la conversión de la energía cinética de partículas cargadas mediante un material centelleador y consta de los siguientes pasos:

- 1) Un fotón incidente en el centelleador produce un electrón energético por efecto Compton o fotoeléctrico. Si la radiación es suficientemente energética se pueden generar también pares electrón-positrón.
- 2) Cuando el electrón atraviesa el centelleador, pierde energía y excita a otros electrones, que se pueden denominar secundarios.
- 3) Algunos de estos electrones son excitados a niveles energéticos que decaen a su estado fundamental emitiendo luz.

El conjunto formado por el material centelleador y el sensor de luz se conoce como detector de centelleo. Para que un detector de centelleo funcione de forma óptima el material centelleador debe producir bastante luz por unidad de energía depositada y además, la luz producida debe llegar al fotosensor con una alta eficiencia. Para ello, el material centelleador debe estar rodeado de materiales reflectantes y ser muy transparente a la luz que emite para evitar la autoabsorción. El sensor genera una señal eléctrica en respuesta a la luz incidente en su superficie. La superficie del fotosensor es por lo tanto un parámetro importante para conseguir que la luz recogida sea máxima.

De forma general, la mayoría de los materiales centelleadores presentan una relación proporcional entre la energía de radiación incidente y la luz que producen. Por lo tanto, la señal de salida de un detector de centelleo es directamente proporcional a la energía depositada por la radiación en el material “sensible” del detector siempre y cuando el fotosensor trabaje también en un modo proporcional. Este hecho depende del fotosensor utilizado y de los parámetros elegidos para su operación.

Las características deseables en un centelleador (ver tabla 1) son:

- Elevado número atómico efectivo (Z efectivo), ya que los materiales con números atómicos elevados presentan un mayor coeficiente de absorción a la radiación gamma y por tanto mayor sensibilidad.
- Alto rendimiento lumínico: un fotón incidente debe de generar un elevado número de fotones de centelleo por unidad de energía depositada, permitiendo mejorar la relación señal ruido del detector.
- Bajo factor de auto-absorción de la luz de centelleo.
- Índice de refracción: para evitar pérdidas por reflexión total interna hay que acoplar ópticamente los índices del centelleador y el sensor de luz. Para ellos se usan grasas ópticas y otros medios de índice intermedio.

-Tiempo de decaimiento del fenómeno de luminiscencia corto para acumular los fotones emitidos en cortos intervalos de tiempo y favorecer también el cociente señal-ruido.

	NaI	BaF ₂	BGO	LSO	GSO
Rendimiento Lumínico [fotones/keV]	38	-	8.2	32	10
Z efectivo	51	54	74	66	59
Índice de Refracción	1.85	-	2.15	1.82	1.85
Longitud de onda [nm]	410	220	480	420	430
Constante de decaimiento [ns]	230	0.8	300	40	56

Tabla.1 Centelleadores más utilizados. En este trabajo en particular se utilizará el NaI

Existen diferentes sensores de luz, en este trabajo se han utilizado tubos de vacío y fotomultiplicadores de silicio descritos a continuación:

-Tubos de vacío (PMTs)

Constan de un recipiente de vidrio sellado a alto vacío que va acoplado al material centelleador. La cara que está en contacto con el cristal de centelleo va cubierta en su interior por un material que emite electrones al recibir luz (fotocátodo), por efecto fotoeléctrico. Estos electrones son acelerados y multiplicados con campos eléctricos secuenciales entre electrodos llamados dínodos (ver figura 1). Por tanto se consigue una señal eléctrica suficientemente grande para poder ser manejada con amplificadores y analizadores de pulsos convencionales.

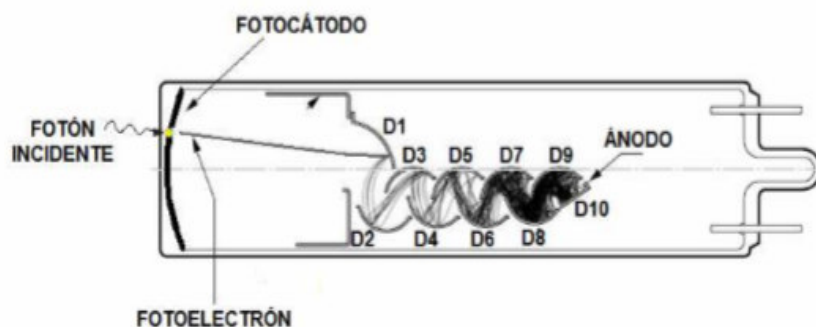


Fig.1 Fotomultiplicador de tubo de vacío

Los fotocátodos se fabrican utilizando metales alcalinos, y están diseñados para responder a una región de longitud de onda según la composición del material base utilizado en la construcción. La sensibilidad a la longitud incidente se conoce como la respuesta espectral o capacidad de respuesta de un fotocátodo (ver figura 2).

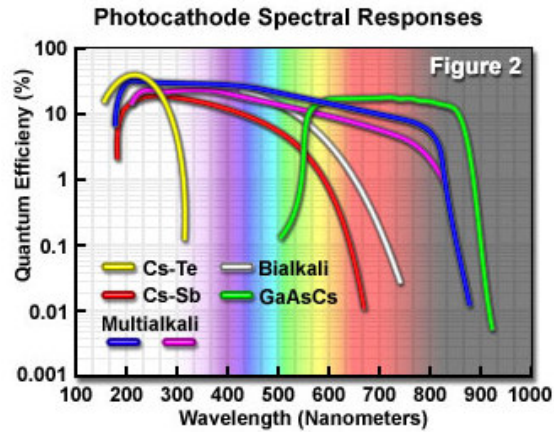


Fig.2 Curvas de respuesta para PMTs convencionales, bialkali y multialkali

-SiPMs

Los SiPMs basan su estructura en la integración de una gran cantidad de microcélulas idénticas e independientes con capacidad de respuesta a un solo fotón.

Cada microcélula consiste en un fotodiodo de avalancha, especialmente diseñado para trabajar en polarización inversa, en serie con una resistencia llamada resistencia de quenching. La resistencia de quenching tiene un valor elevado ya que su objetivo es limitar la corriente y detener el proceso de avalancha para devolver al diodo a su voltaje de operación, superior a la tensión de ruptura, voltaje a partir del cual el diodo conduce.

Debido a que la respuesta de cada microcélula se limita a un solo fotón, no proporcionan información sobre la intensidad de un evento luminoso. Sin embargo, cuando se agrupan una gran cantidad de microcélulas en paralelo, la corriente de salida será la suma de las corrientes generadas en todas las microcélulas y será aproximadamente proporcional al número de fotones incidentes.

Por tanto la estructura básica de un fotomultiplicador de silicio (ver figura 3) consiste en:

- Un gran número de sensores elementales, microcélulas, operando en avalancha por encima de la tensión de ruptura, distribuidas en un substrato común, típicamente de un tamaño de unos pocos mm^2
- Elementos implementados para el “quenching” en cada microcélula, actualmente se utilizan elementos pasivos -resistores.
- Un sistema de electrodo común en el que se conectan individualmente todas las microcélulas a una salida común.

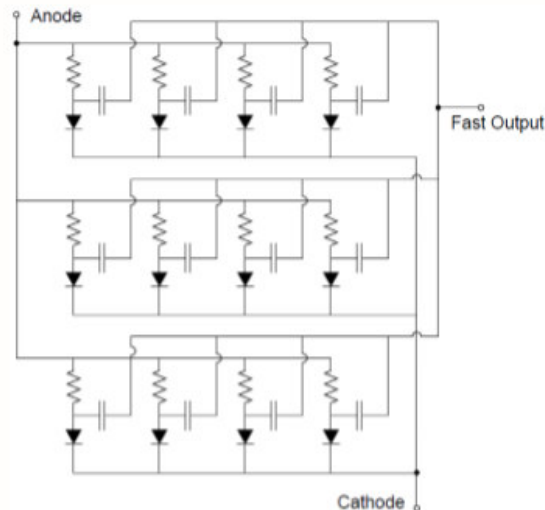


Fig.3 Esquema SiPM

Como se ve en la figura 4, los fotodiodos de silicio tienen una respuesta relativamente plana en todo el espectro visible con una alta eficiencia cuántica que puede llegar hasta el 80 por ciento.

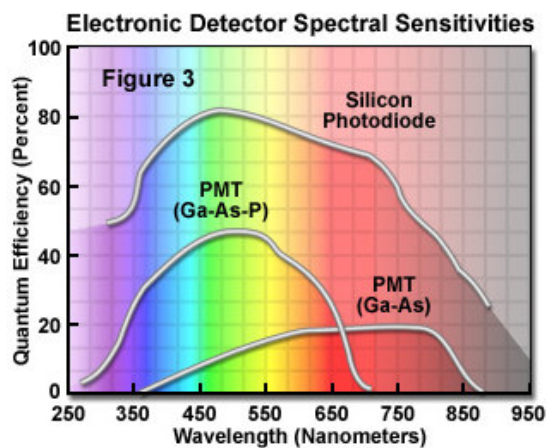


Fig.4 Curvas de sensibilidad para PMTs y SiPMs

2.2-Interacción entre radiación y materia

Los electrones generados en el centelleador poseen distribuciones de energía diferentes dependiendo de si han sido creados por efecto Compton o por fotoeléctrico. En el efecto fotoeléctrico, toda la energía del fotón se transfiere al electrón y la distribución de energía del electrón es claramente similar a la del fotón incidente. Sin embargo en el efecto Compton, los electrones tienen un rango de energía que depende del ángulo del fotón dispersado.

Efecto fotoeléctrico:

Se produce cuando un fotón incidente cede toda su energía a un electrón del material, arrancándolo del átomo. La energía cinética del electrón (Te) será la energía del fotón incidente ($h\nu$) menos la energía de ligadura del electrón al átomo ($B_{K,L}$).

$$Te = h\nu - B_{K,L} \quad (1)$$

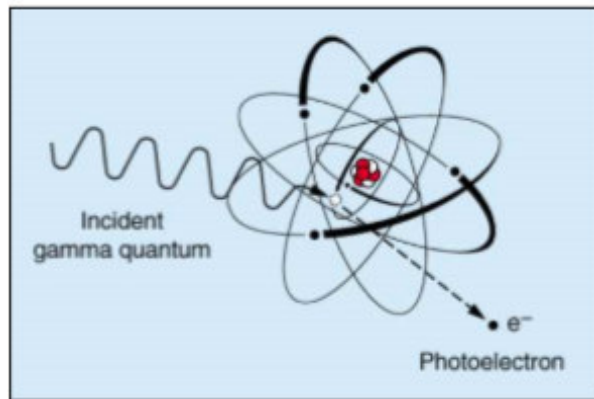


Fig.5 Efecto fotoeléctrico

Efecto Compton:

Se produce cuando un fotón incidente cede parte de su energía a un electrón débilmente ligado. El fotón incidente sale dispersado (respecto a su trayectoria original) y con menor energía. La energía cinética del electrón (Te) será la energía del fotón incidente ($h\nu$) menos la energía del fotón dispersado ($h\nu'$).

$$Te = h\nu - h\nu' \quad (2)$$

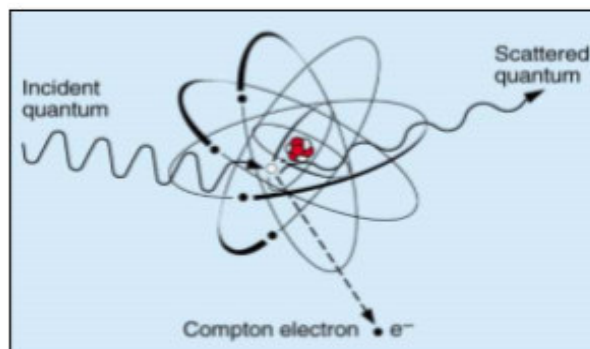


Fig.6 Efecto Compton

Creación de pares:

Es debido a la interacción de fotones de alta energía con el campo eléctrico originado por partículas cargadas produciendo su desaparición y dando como resultado un electrón y un positrón. Se requiere una energía mínima umbral del fotón incidente de 1,02 MeV. El positrón una vez frenado se aniquilará con algún electrón del medio material, dando lugar a dos fotones gamma de 0,511 MeV. Estos fotones podrán escapar del detector o interactuar en él, sea por efecto fotoeléctrico o compton.

$$h\nu \geq 2m_e c^2 = 1,02 \text{ MeV} \quad (3)$$

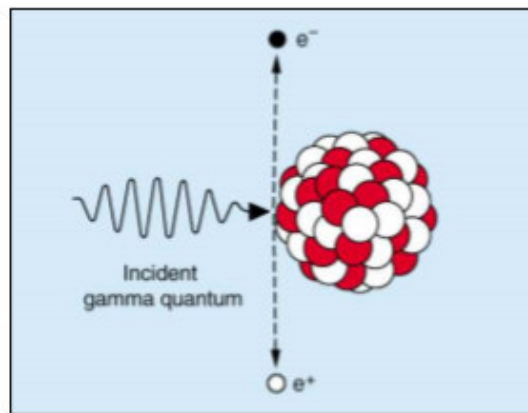


Fig.7 Creación de pares

3.-Descripción del montaje experimental

En este trabajo se han utilizado dos montajes experimentales que se muestran en las figuras 8 y 9. En uno de ellos la fuente de luz es un cristal centelleador de NaI, que se expondrá a distintas fuentes de radiación gamma (figura 8). En el otro (figura 9) la luz se produce en un LED, mediante un generador de ondas, y es transmitida mediante una fibra óptica al sensor de luz.

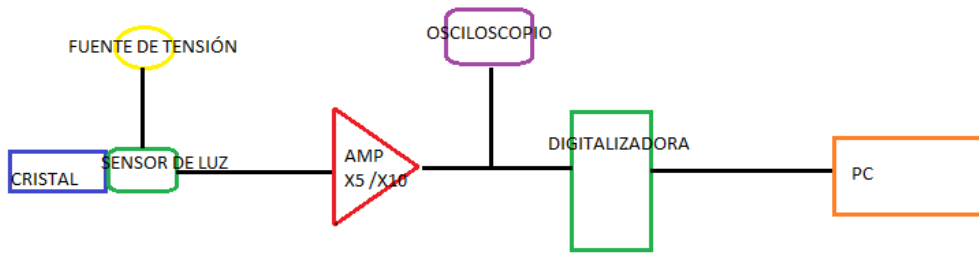


Fig.8 Esquema del proceso de medida con cristal centelleador

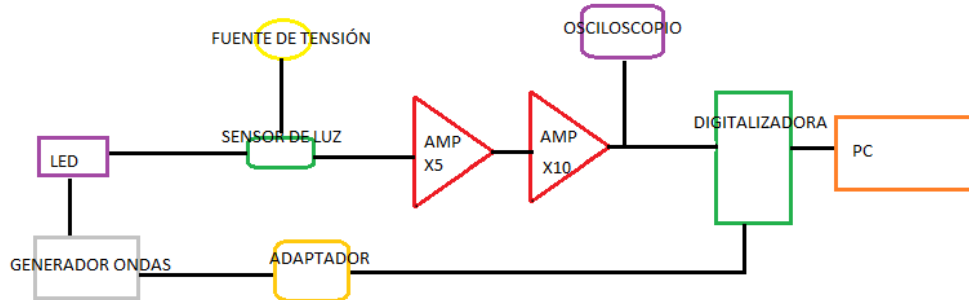


Fig.9 Esquema del proceso de medida con emisor LED

El equipo de trabajo utilizado consta de:

-Detector de centelleo: El cristal centelleador utilizado es NaI (TI) y el sensor de luz correspondiente PMT o SiPM. Se ha utilizado el PMT modelo “R1924A” bialkali de 25mm de diámetro y el SiPM modelo “ARRAYC-60035-4P”, una matriz 2x2 de sensores, cada uno de los cuales presenta unas dimensiones de $6 \times 6 \text{ mm}^2$ y 18980 microcélulas de $35 \mu\text{m}$ cada una (ver figura 11). El conjunto se instala dentro de un cilindro de aluminio que evita que penetre la luz ambiente.

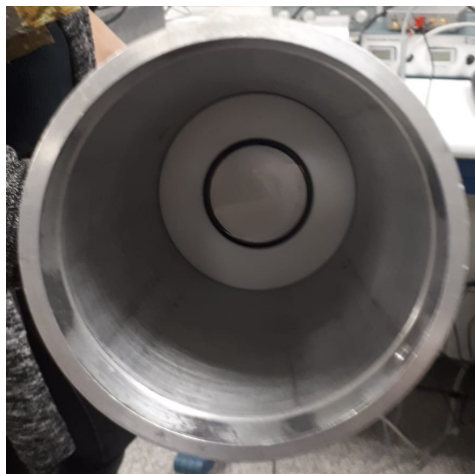


Fig.10 Cristal centelleador dentro del cilindro de aluminio, antes de acoplar el sensor de luz

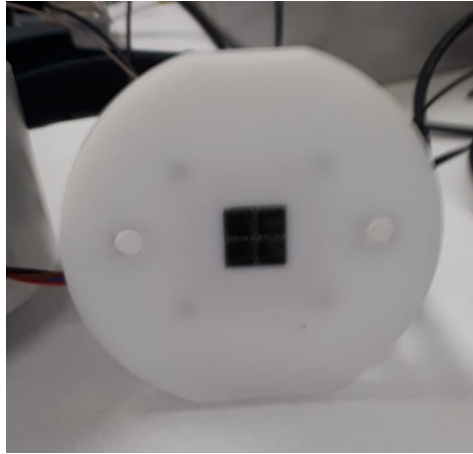


Fig.11 Adaptación SiPM al detector. Se observan los cuatro elementos de que consta la matriz

-Amplificador y preamplificador: Se utilizan amplificadores de diferente ganancia (x5 o x10) para poder trabajar con la señal.



Fig.12 Amplificador utilizado

-Digitalizadora: Digitaliza la señal analógica del amplificador producida por el detector a una frecuencia de 2Gs/s, tiene una resolución vertical de 12 bits y presenta un rango de entrada de 0.1V a -0.9V.

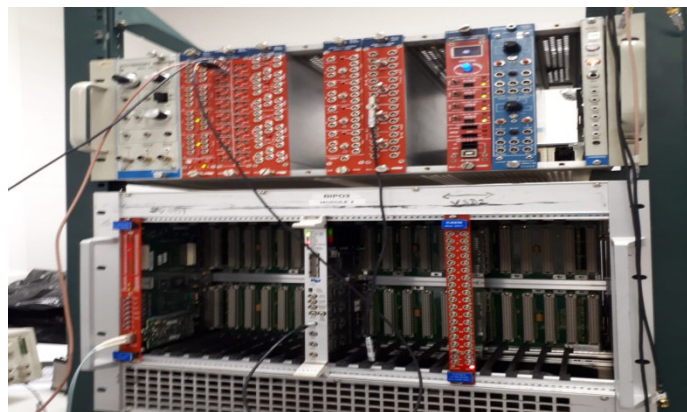


Fig.13 Digitalizadora utilizada

-Osciloscopio: permite observar los pulsos del detector para ajustar los parámetros de la adquisición de datos.

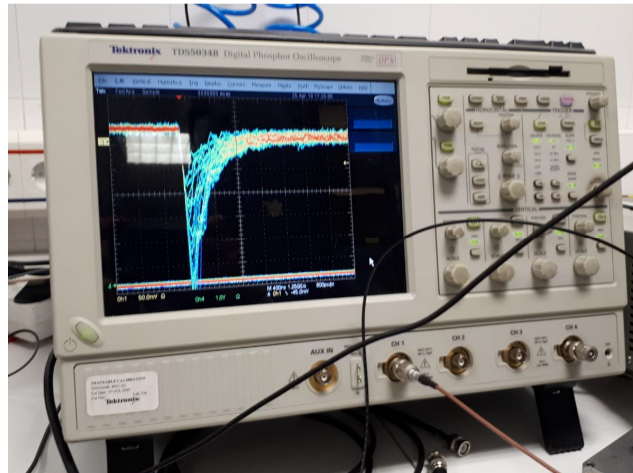


Fig.14 Osciloscopio utilizado

-Generador de ondas: produce un pulso de voltaje periódico que alimenta el LED, produciendo así un pulso de luz periódico que a través de la fibra óptica se introduce en el cilindro de aluminio e ilumina el sensor. Se ha utilizado una señal cuadrada de periodo $100\mu\text{s}$, anchura 100ns y amplitud 1 V .



Fig.15 Generador de ondas utilizado

-LED + Regulador fibra óptica: Dentro de la caja que se observa en la figura 15 está el LED-UV y una serie de filtros que permiten atenuar la intensidad de luz que saldrá a través de la fibra óptica, se ha trabajado solo con intensidades mínimas para registrar un menor número de fotoelectrones.



Fig.16 Regulador fibra óptica

-Fuente de tensión del SiPM: suministra el voltaje para el funcionamiento del SiPM ($\sim 26V$).



Fig.17 Fuente de tensión SiPM

-Fuente de tensión del PMT: suministra el voltaje para el funcionamiento del PMT ($\sim 1000V$).



Fig.18 Fuente de tensión PMT

4.-Metodología

Medidas experimentales

En el caso del montaje correspondiente a la figura 6, con cristal centelleador de NaI, se han realizado medidas con diferentes fuentes radioactivas como Cs-137, Ba-133 y Na-22, utilizando tanto el fotomultiplicador de tubo de vacío (PMT) como el fotomultiplicador de silicio (SiPM). Como interesa poder visualizar los picos de energía característicos de cada fuente se ha tenido que variar la ganancia del amplificador según la energía de los picos a observar. Destacar que el cristal centelleador de NaI (TI) inicialmente utilizado estaba ligeramente degradado y su salida de luz no era óptima, por lo que se procedió a un cambio del mismo.

Adquisición y análisis de datos

La señal que se recoge en el detector, al ser analógica se amplifica y digitaliza para posteriormente ser almacenada en un fichero de datos en el PC, estando el proceso de medida totalmente informatizado. El fichero de datos contiene la forma del pulso digitalizada para cada suceso (ventana de digitalización de 2500 puntos a 2GS/s = 1250 ns). Posteriormente se analiza mediante un programa de análisis basado en el paquete “Root”, que además de visualizar la forma de los pulsos permite analizar otros parámetros relevantes, en particular el área de cada pulso digitalizado (ver figuras 19 y 20).

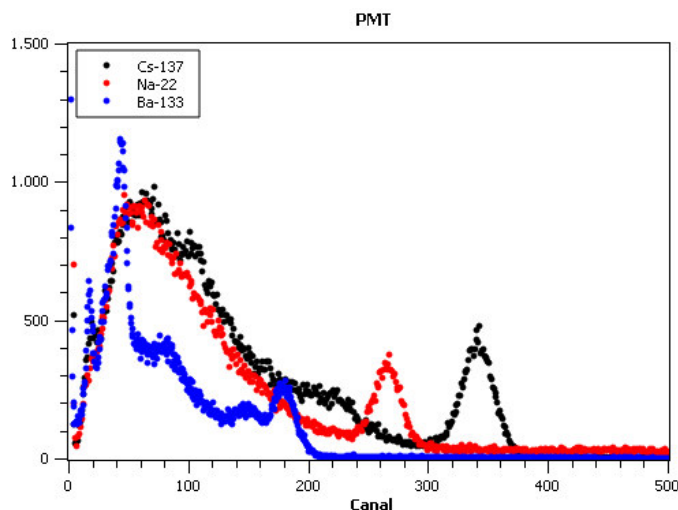


Fig.19 Espectros para las distintas fuentes obtenidos en el montaje con PMT

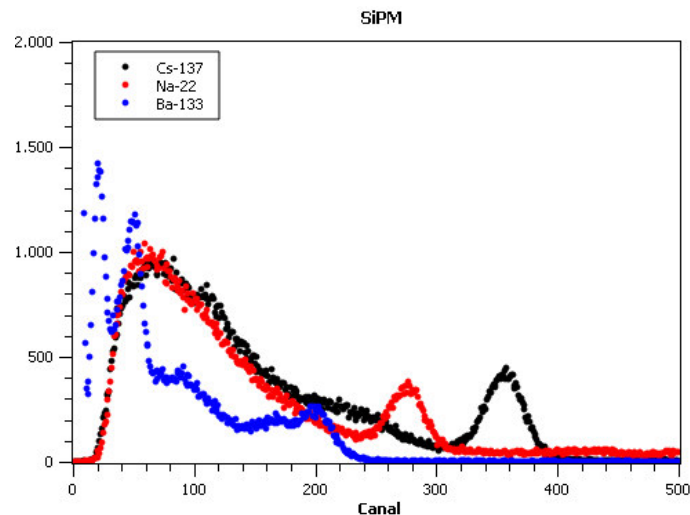


Fig.20 Espectros para las distintas fuentes obtenidos en el montaje con SiPM

Dado que el área del pulso es proporcional a la energía depositada, el análisis del histograma de áreas (figuras 19 y 20) permitirá obtener información relevante sobre la linealidad y resolución energética de cada uno de nuestros montajes. En dichas figuras se ha realizado un bineado de los espectros con 1000 bins, donde se ha designado el número de bin dentro del histograma como “canal”. Con el programa “ArsSpectra” se ha realizado un ajuste gaussiano a los picos observados para obtener su media y desviación estándar. En algunos espectros aparecen picos muy próximos. En el Ba-133 por ejemplo, se emiten fotones correspondientes a energías de 30,85 keV y 81 keV, pero entre ellos aparece un pico adicional en el espectro debido al escape de los rayos X del yodo cuando el fotón de 81 keV interacciona por efecto fotoeléctrico. En este caso, se han realizado ajustes a 2 y 3 picos (ver figuras 21 y 22) para tratar de valorar el error sistemático cometido en el ajuste.

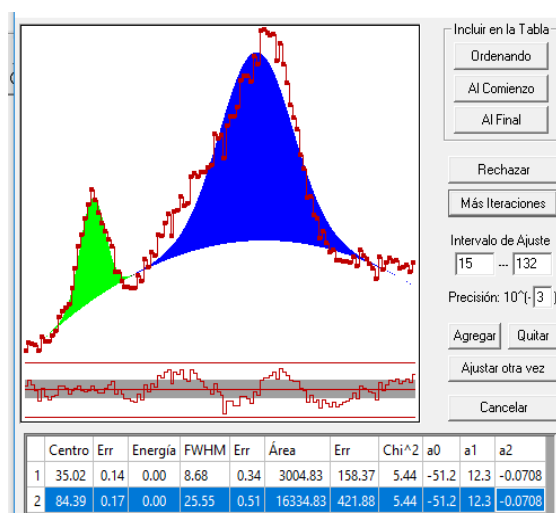


Fig.21 Ajuste a 2 picos Ba-133

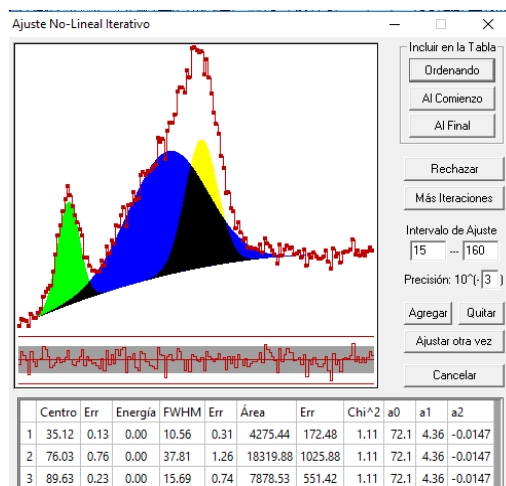


Fig.22 Ajuste a 3 picos Ba-133

5.-Resultados

5.1-Respuesta temporal

Utilizando el montaje del emisor de luz LED-UV descrito en el apartado de “montaje experimental”, se puede comparar la respuesta temporal entre los dos sensores de luz PMT y SiPM para un único fotoelectrón. En las figuras 23 y 24 se muestran ejemplos de pulsos de fotoelectrón. Mediante el programa de análisis se ha calculado el pulso promedio (de unos 100 pulsos) y se ha realizado mediante el programa “ArsSpectra” un ajuste gaussiano del mismo para determinar la anchura a media altura (ver tabla 2).

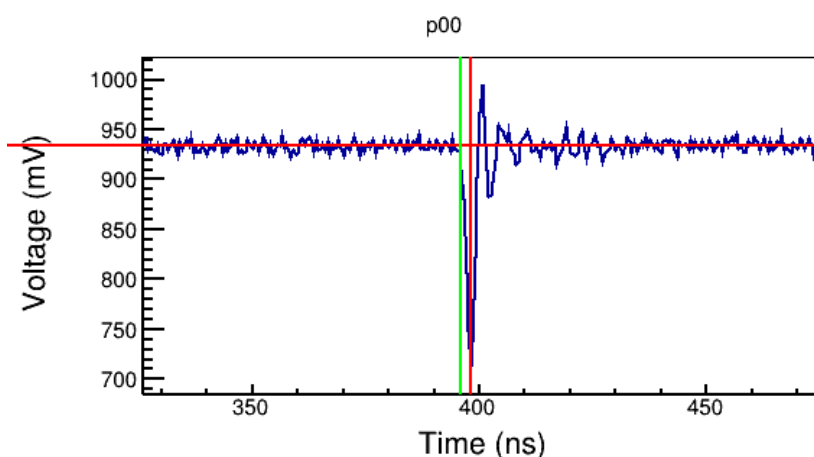


Fig.23 Ejemplo de un pulso con PMT

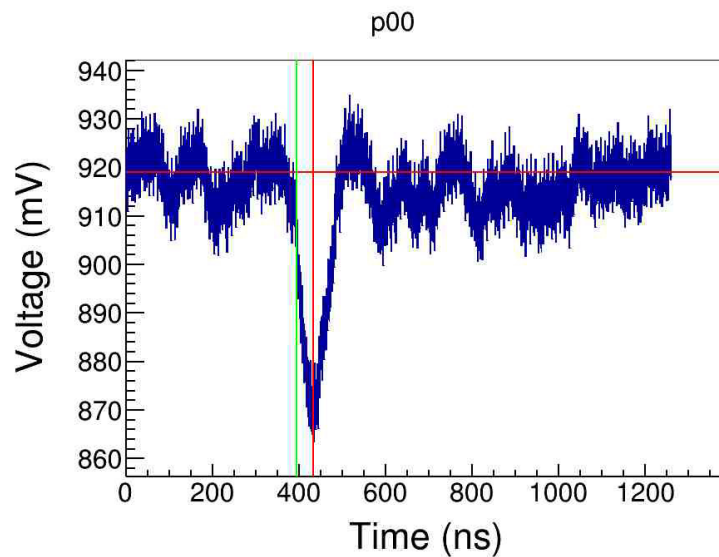


Fig.24 Ejemplo de un pulso con SiPM

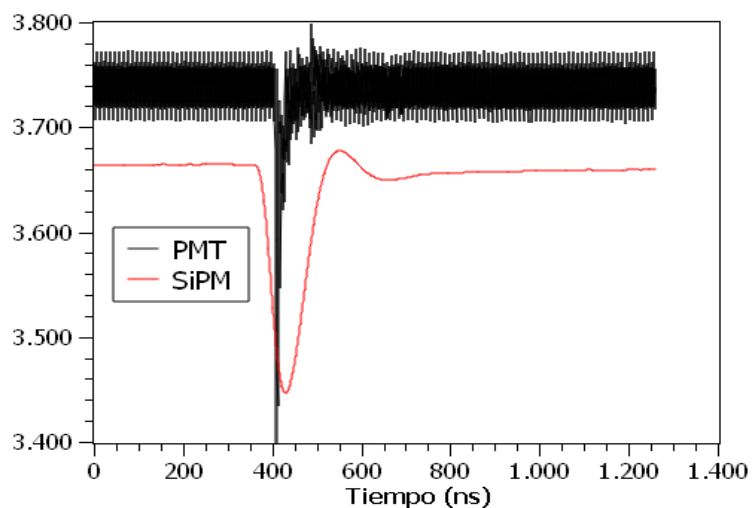


Fig.25 Comparación entre pulsos promedio PMT y SiPM

En la figura 25, debido a la gran componente a alta frecuencia que presentan los pulsos se ha procedido a su eliminación con un filtro pasa-baja en el caso del SiPM. Sin embargo, dicho filtro no se ha podido aplicar al PMT debido a que se provoca un ensanchamiento del pulso, esto se puede observar en la figura 26.

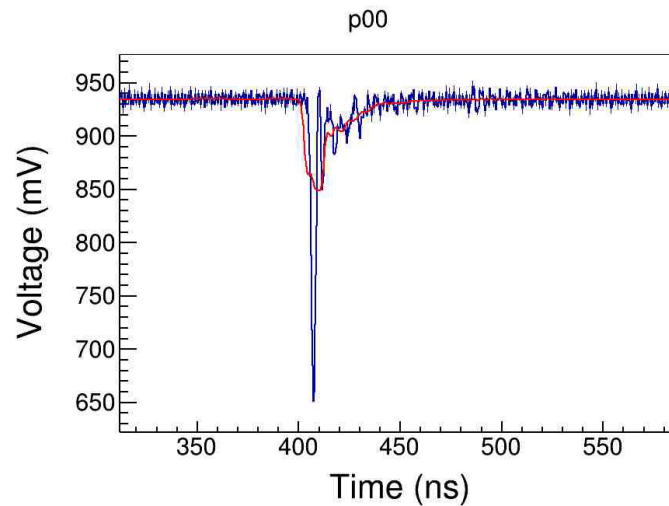


Fig.26 Ensanchamiento del pulso al aplicar el filtro pasa-baja (línea roja) respecto al pulso sin filtrar

	PMT	SiPM
FWHM (ns)	$1,74 \pm 0,31$	$86,97 \pm 6,78$

Tabla.2 FWHM PMT y SiPM de los pulsos promedio

Por tanto se puede decir que el SiPM es unas 50 veces más lento que el PMT, además hay que destacar un mayor rizado en el SiPM, como se observa en la figura 24, lo que nos indica una mayor corriente oscura en dicho sensor de luz.

5.2-Linealidad

Una vez obtenidos la media (el canal) y la desviación estándar para cada pico resulta interesante comprobar la linealidad del PMT y del SiPM. Para ello en primer lugar se establece una equivalencia energía-canal asignándole a cada canal una determinada energía que se corresponde con la energía del pico del espectro de emisión de cada fuente. Los valores de las energías asignados se han obtenido de la web “<http://nucleardata.nuclear.lu.se>”, en el caso de que haya varias emisiones muy próximas contribuyendo en un determinado pico, se ha tomado la media de las energías ponderadas por la intensidad de la emisión.

PMT		
Energía (keV)	μ_0	FWHM
30,85	$35,56 \pm 0,46$	$11,25 \pm 0,33$
81,00	$84,39 \pm 5,24$	$25,55 \pm 0,51$
356,02	$360,32 \pm 0,50$	$43,02 \pm 1,25$
511,00	$532,72 \pm 0,40$	$53,14 \pm 0,70$
661,66	$683,68 \pm 0,30$	$31,05 \pm 0,62$

Tabla.3 Valores de energía, canal y anchura a media altura, con sus errores, para PMT

SiPM		
Energía (keV)	μ_0	FWHM
30,85	21,55±0,40	11,09±0,26
81,00	47,33±4,00	21,18±0,57
356,02	196,64±0,33	26,93±0,80
511,00	275,72±0,23	32,07±0,65
661,66	356,10±0,16	36,27±0,35
1274,50	428,31±2,78	42,98±18,21

Tabla.4 Valores de energía, canal y anchura a media altura, con sus errores, para SiPM

Con los datos de las tablas anteriores se ha realizado un ajuste lineal con el programa “SciDavis” del canal frente a la energía.

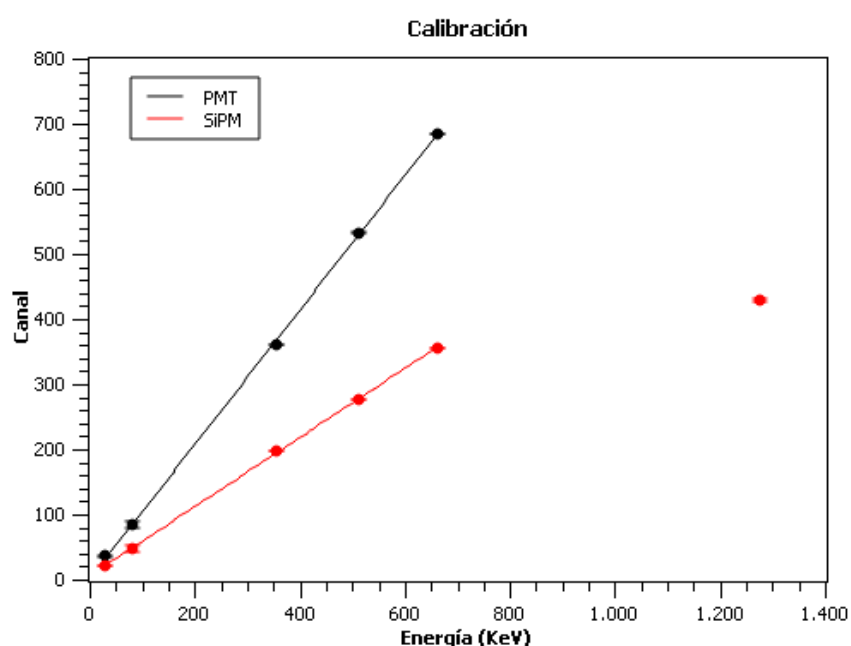


Fig.27 Rectas calibración PMT y SiPM

Se observan efectos de saturación en la operación del SiPM: a altas energías depositadas se pierde la proporcionalidad en la respuesta. Por este motivo, no se ha incluido el punto de E=1274,5 keV, para realizar el ajuste lineal en el SiPM.

PMT	
Pendiente (keV ⁻¹)	1,031±0,010
Ordenada origen	0,994±4,150
χ^2	91,442

Tabla.5 Ajuste lineal PMT

SiPM	
Pendiente (keV⁻¹)	0,531±0,003
Ordenada origen	5,248±1,178
χ^2	7,368

Tabla.6 Ajuste lineal SiPM

Se observa por tanto que el PMT y el SiPM tienen respuesta lineal para el rango de energías 30,85-661,66 keV. El χ^2 tan elevado obtenido para el ajuste de los datos del PMT es debido a los bajos errores que presentan los puntos ajustados. Esto indica que en dichas medidas solo se ha considerado su incertidumbre estadística, siendo probablemente importante la incertidumbre sistemática, que no hemos considerado. También es posible que el comportamiento del PMT no sea completamente lineal en el rango energético considerado.

5.3-Resolución

Otro aspecto interesante es comparar la resolución del sistema cuando se utiliza el fotomultiplicador de tubo de vacío (PMT) y el fotomultiplicador de silicio (SiPM). A continuación, tomaremos como resolución para cada una de las líneas identificadas:

$$Resolución = \frac{\sigma}{\mu_0} \quad (4)$$

Siendo σ la desviación estándar de la distribución del ajuste, que se ha supuesto gaussiana y μ_0 el canal que corresponde a su centro.

Dicha resolución se puede expresar en unidades de energía multiplicándola por la energía equivalente a ese canal:

$$Resolución (keV) = E(keV) \frac{\sigma}{\mu_0} \quad (5)$$

PMT		
Energía (keV)	Resolución (%)	Resolución (keV)
30,85	13,43±0,43	4,14±0,13
81,00	8,24±2,7	6,68±2,19
356,02	5,07±0,05	18,05±0,53
511,00	4,24±0,04	21,65±0,29
661,66	1,93±0,02	25,52±0,25

Tabla.7 Valores resolución porcentuales y en energía PMT

SiPM		
Energía (keV)	Resolución (%)	Resolución (keV)
30,85	21,85±0,65	6,74±0,20
81,00	13,15±3,95	10,65±3,19
356,02	5,65±0,17	20,12±0,62
511,00	4,94±0,10	25,24±0,51
661,66	4,33±0,04	28,62±0,28

Tabla.8 Valores resolución porcentuales y en energía SiPM

Con los datos de las tablas anteriores se ha representado la resolución frente a la energía y utilizando el programa “Root”, se ha realizado un ajuste a la función:

$$Resolución = \sqrt{a + E/b} \quad (6)$$

Siendo a, b parámetros a determinar.

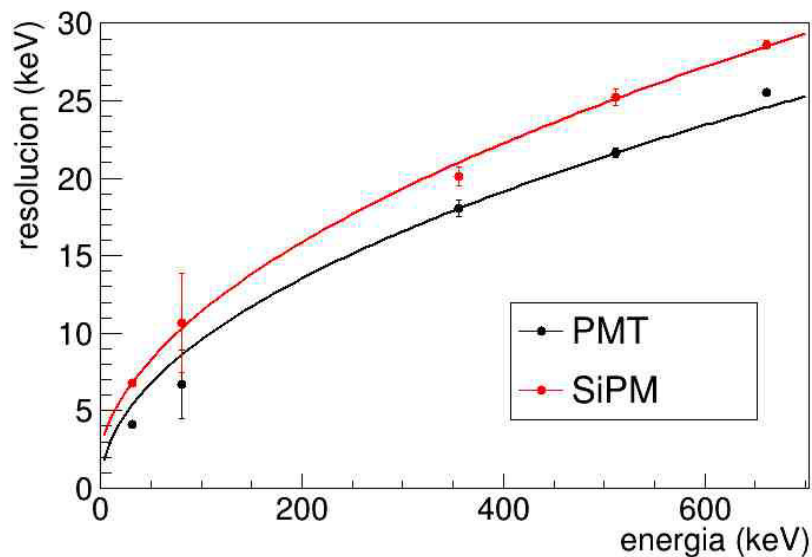


Fig.28 Resolución PMT y SiPM

La resolución se observa que es claramente mejor (más pequeña) en el PMT que en el SiPM.

PMT	
a (keV ²)	2,8x10 ⁻¹⁰ ±8,1x10 ⁻²
b (keV ⁻¹)	1,09±0,02
χ ²	31,86

Tabla.9 Parámetros resolución PMT

SiPM	
a (keV²)	7,67±2,91
b (keV⁻¹)	0,82±0,02
χ^2	0,75

Tabla.10 Parámetros resolución SiPM

5.4-Recolección de luz

Se define la recogida de luz (L) en un sensor como el número de fotoelectrones producidos por unidad de energía, por tanto:

$$E(keV) = \frac{N_{ph}}{L} \quad (7)$$

Donde N_{ph} es el número de fotones que recoge el sensor de luz y producen en él señal, L es el rendimiento lumínico o número de fotoelectrones por keV.

La resolución del detector depende por tanto de la desviación estándar en el número de fotoelectrones producidos en el sensor de luz por un depósito energético concreto, y si despreciamos otras posibles contribuciones a la resolución:

$$\sigma_E = \frac{1}{L} \sigma_{ph} \quad (8)$$

Como el número de fotoelectrones sigue una distribución de Poisson:

$$\begin{aligned} \sigma_{ph} &= \sqrt{N_{ph}} \rightarrow \\ \rightarrow \sigma_E &= \frac{1}{L} \sqrt{N_{ph}} = \sqrt{\frac{E(keV)}{L}} \end{aligned} \quad (9)$$

Por tanto los parámetros a , b obtenidos en el apartado anterior se les puede dar un sentido físico. El parámetro b se corresponde con el factor L o de recogida de luz y el parámetro a indica si hay otros términos importantes contribuyendo a la resolución del detector. Suponiendo un término adicional en la resolución σ_0 y que ambos términos (σ_0 y σ_E) se suman en cuadratura, se puede identificar el parámetro a con σ_0^2 . El valor similar obtenido para el parámetro b con ambos sensores indica que la recogida de luz es similar en el PMT y SiPM. En el PMT el parámetro a es compatible con cero pero no en el SiPM (ver tablas 9 y 10). El término adicional en la resolución del SiPM (σ_0), incluye contribuciones sistemáticas como la corriente oscura en la línea de base (ver figura 24).

6.-Conclusiones

Tras haber realizado un estudio entre los diferentes parámetros que caracterizan un sensor de luz, comparando el fotomultiplicador de tubo de vacío (PMT) con el fotomultiplicador de silicio (SiPM) hay que destacar aspectos de importancia como el menor tamaño del SiPM frente al PMT, la diferencia en el voltaje de alimentación entre ambos dispositivos $\sim 26\text{V}/\sim 1000\text{V}$ respectivamente, lo cual produce que las fuentes de tensión del SiPM sean bastante más económicas o el mayor rango de longitudes de onda en las que es sensible el SiPM respecto al PMT. Los puntos más importantes tratados en este trabajo son:

- 1.- La respuesta temporal es mucho mayor (unas 50 veces más) en el SiPM que en el PMT.
- 2.- Los dos sensores de luz PMT y SiPM son elementos razonablemente lineales en el rango de energías 30,85-661,66 keV, a mayores energías aparecen efectos de saturación especialmente en el SiPM.
- 3.- En el rango lineal de energías, el PMT presenta mejor resolución que el SiPM.
- 4.- La recolección de luz es del mismo orden de magnitud en ambos sensores. Sin embargo, en el SiPM aparecen contribuciones que empeoran la resolución de tipo sistemático como es probablemente el efecto de la corriente oscura que genera un rizado importante en la línea de base del pulso que afecta a la determinación de su área y por lo tanto, de su energía.

En definitiva, la aplicación de SiPM a la lectura óptica de un cristal de NaI ha proporcionado resultados satisfactorios. Se ha observado un comportamiento lineal hasta 661 keV y una resolución energética peor que con el PMT, pero probablemente a causa de los efectos de la corriente oscura en el SiPM. Como prolongación natural de este análisis, habría que implementar el estudio de la señal del SiPM haciendo uso de una salida rápida de la que carece el modelo utilizado en este trabajo o disminuyendo la temperatura que afecta directamente a la corriente oscura, para poder evaluar mejor las posibilidades de mejorar la resolución en energía del dispositivo.

Bibliografía

- Leo, W. R. "Techniques for nuclear and particle physics experiments", *Springer-Verlag*, 1994.
- “Photomultiplier Tubes: Basics and Applications (Third Edition)” *Hamamatsu Photonics*, February 2006.
- S.Y.F. Chu, L.P. Ekström and R.B. Firestone “The Lund/LBNL Nuclear Data Search”, February 1999, <http://nucleardata.nuclear.lu.se>.
- “Introduction to SiPM, technical note sensl”, <https://www.sensl.com/downloads/ds>.
- Valeri Saveliev “Silicon Photomultiplier-New Era of Photon Detection”, *National Research Nuclear University Russia*.
- M. J. Agulló Antón “Evaluación de los fotomultiplicadores de silicio (SiPM) como alternativa a los fotomultiplicadores de tubo de vacío (PMT) en un front-end integrado para aplicaciones PET”, *tesis fin de máster*.
- “ArrayC Series Silicon Photomultiplier (SiPM) 4-Side Scaleable Arrays”, *Semiconductor Components Industries*, 2018.
- “Photomultiplier tube R1924A”, *Hamamatsu photonics K.K.*
- <http://olympus.magnet.fsu.edu/primer/techniques/confocal/pmtintro.html>
- <http://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/digitalimagingdetectors.html>